

**Mónica ME Fiore, Enrique E D'Onofrio y  
Walter H Grismeyer**

Servicio de Hidrografía Naval

**Dernis G Mediavilla**

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA



# El ascenso del nivel del mar en la costa de la provincia de Buenos Aires

La marea se define como la oscilación periódica del nivel del mar que resulta de la atracción gravitacional de la Luna y el Sol que actúa sobre la Tierra en rotación. Este movimiento vertical es acompañado por uno horizontal denominado 'corriente de marea', provocado por las mismas causas. Esta definición corresponde a lo que se conoce como 'marea astronómica o predicha'. Su carácter determinístico permite su predicción y la confección de tablas de marea (predicciones de pleamares y bajamares).

Existen factores que modifican la marea astronómica, alterando su forma y periodicidad, y dificultando así su predicción. Los principales son las condiciones meteorológicas, la topografía del fondo, los accidentes geográficos, los desagües de ríos, la fusión de los hielos y las variaciones de temperatura y salinidad. Debido a esto, la marea observada se puede considerar compuesta fundamentalmente por la suma de tres términos: nivel medio, marea astronómica y onda de tormenta (efecto de la acción meteorológica sobre la marea). Los fenómenos físicos que los producen son

## ¿DE QUÉ SE TRATA?

El nivel medio del mar, que solía ser una constante en los cálculos de diseño de obras civiles costeras, ha demostrado ser una variable espacial y temporal, gracias a la mayor precisión de los métodos de medición y como consecuencia de los cambios climáticos globales. Su cálculo cobra mayor importancia con relación a la vida útil de los proyectos costeros.



diferentes y sus representaciones espectrales en el dominio de la frecuencia permiten estudiarlos separadamente. Sin embargo, este hecho no implica que el efecto total esté dado por la suma de los individuales ya que, debido a los procesos no lineales que tienen lugar en aguas poco profundas, cada una de las partes componentes aquí mencionadas puede interactuar dinámicamente con las demás.

## ¿Qué es el nivel medio del mar?

El nivel medio del mar se define como la media aritmética de alturas registradas en un mareógrafo en forma horaria (o en un intervalo menor) obtenidas durante un período variable, pero siempre conteniendo ciclos completos de marea (por ejemplo, un mes, un año o diecinueve años). De esta manera se logra eliminar la contribución de la marea en el cálculo del nivel medio. También existen ciclos mayores de diecinueve años, por ejemplo el de precesión de los equinoccios de aproximadamente 20.942 años o el de inclinación del eje de la Tierra de alrededor de 41.000 años. Estos ciclos no son tenidos en cuenta para el cálculo de los niveles medios a partir de registros mareográficos, pues las variaciones del nivel del mar que originan no son significativas frente a las provocadas por movimientos tectónicos y/o glaciaciones que se hayan producido en esos lapsos.

El nivel medio del mar determinado por series de 18,67 años de observación (ciclos de los nodos de la Luna), corregidas por modelos de circulación, de influencia meteorológica y de tectónica de placas es una buena primera aproximación al geoide.

En un sentido estricto, el geoide es la superficie de nivel del campo de gravedad terrestre que se aproxima al nivel medio del mar y su conocimiento es crucial para el desarrollo de trabajos geodésicos, geofísicos y oceanográficos.

El nivel medio calculado a partir de una serie de alturas de marea de diecinueve años, sin efectuar esas correcciones, tendrá diferencias con el geoide que en los casos más desfavorables pueden exceder el metro.

## Cambios del nivel del mar

Durante los milenios que siguieron al último período glaciario, de hace unos 21.000 años, el nivel del mar se elevó globalmente unos 125m, como consecuencia del derretimiento de los hielos. Numerosos autores coinciden en que para los últimos 2000 o 3000 años la variación del nivel medio fue muy pequeña comparada con la registrada durante el siglo XX.

Desde las últimas dos décadas del siglo XX se han presentado trabajos donde se advierte sobre el ascenso del nivel medio del mar como una de las consecuencias del cambio climático global. El aumento de la temperatura del planeta produce el derretimiento de las grandes masas de hielo y la expansión térmica del agua oceánica, ocasionando el ascenso relativo del nivel del mar.

No todas las regiones son afectadas de igual forma. A escala global se detecta una tendencia de ascenso, sin embargo cabe mencionar que existen algunas excepciones en las que se observa una tendencia negativa, estas son regiones tectónicamente activas o áreas cubiertas por espesas capas de hielo que se están derritiendo. Un ejemplo de este último caso se observa en la ciudad de Sitka (Alaska), donde la elevación isostática de la tierra debida a la disminución de la capa de hielo ha provocado una tendencia negativa del nivel medio.

*La isostasia es la condición de equilibrio que presentan las unidades de la corteza terrestre, comparable a la flotación, sobre el manto terrestre de mayor densidad. La eliminación de la capa de hielo de una región produce un alivio en el peso y la recuperación del equilibrio se produce por ascenso, mediante movimientos verticales, de la corteza. Cuando esta se eleva, el movimiento relativo del nivel del mar resulta de descenso o negativo.*

El nivel medio del mar, que antiguamente a los efectos prácticos era considerado solo variable espacialmente, resultaba una constante en los cálculos de diseño de obras civiles costeras. En la actualidad es una variable espacial y temporal que cobra mayor importancia en relación directa con la vida útil del proyecto. A partir de la década del 80, se han realizado cálculos para evaluar la tendencia del nivel medio referida a puntos fijos ubicados en las costas argentinas, obteniéndose resultados que concuerdan con los calculados a nivel global (aproximadamente +2mm/año, para el siglo XX). A esta tendencia se la conoce como relativa pues no considera el movimiento vertical de la corteza terrestre donde están colocados los puntos fijos.

Con el objeto de obtener tendencias absolutas del nivel medio del mar, en marzo de 2001 el Servicio Internacional de Posicionamiento Global International GPS Service (IGS, por sus siglas en inglés) implementó un proyecto piloto de monitoreo de las ondas de marea, el GPS Tide Gauge Benchmark Monitoring-Pilot Project (TIGA-PP, [http://adsc.gfz-potsdam.de/tiga/index\\_TIGA.html](http://adsc.gfz-potsdam.de/tiga/index_TIGA.html)), cuyo objetivo es monitorear con equipos GPS (Global Positioning System) puntos fijos en las estaciones mareográficas o cercanos a ellas para detectar movimientos verticales de la corteza terrestre. Estos resultados aplicados a las mediciones relativas del nivel medio del mar permiten obtener valores absolutos y constituyen un aporte importante para los estudios de cambio climático. Asimismo, también pueden ser utilizados para la calibración de altímetros satelitales y otras actividades oceanográficas.

Los cambios en el nivel medio del mar a escala global son estudiados por las misiones de los satélites altimétricos de alta precisión como el Jason1, que continúa la misión TOPEX/Poseidon, iniciada en 1992, y permiten obtener alturas absolutas de la superficie del nivel del mar, con respecto a un marco de referencia geocéntrico, preciso y estable a lo largo del tiempo. En relación con este punto, se recomienda la consulta a la página <http://topex-www.jpl.nasa.gov> de la NASA y la lectura de CIENCIA HOY, 104: 14-17, 2008 sobre ‘Satélites como instrumentos científicos’.

El aumento del nivel medio contribuye a que las alturas extremas de marea alcanzadas durante las grandes tormentas sean cada vez más altas, incrementando las probabilidades de inundación y de erosión en las áreas costeras más bajas. Por ejemplo, en aquellas zonas del Río de la Plata donde el hombre rellenó el sector costero ha disminuido el riesgo de inundación, pero no los problemas ocasionados por la erosión de playa y retroceso de la línea de costa. En otras zonas del estuario como el frente del delta del río Paraná, las sudestadadas (CIENCIA HOY, 67: 38-45, 2002) producen inundaciones de zonas costeras en forma directa y/o indirecta cuando impiden la descarga normal de los cursos de agua. Cabe destacar que recientes investigaciones muestran que el anticiclón del Atlántico Sur está desplazándose lentamente hacia el sur, incrementando el número de sudestadadas y agravando de esta forma la situación.

Un caso particular lo constituye la ciudad de Buenos Aires, donde uno de los principales causales de inundación son las precipitaciones intensas, como resultado de la impermeabilización de la superficie, las obras de alcantarillado y los entubamientos de cursos de agua. Esto se debe a que la red de desagües existente no es suficiente para la población actual y su grado de edificación. Sin embargo, las sudestadadas representan otro de los factores desencadenantes de los eventos de inundación en la ciudad. Durante una sudestadada, el nivel del río aumenta, actuando como un tapón hidráulico en la desembocadura de los desagües y produciendo que el agua reingrese a la ciudad.

La costa atlántica de la provincia de Buenos Aires presenta importantes centros turísticos, entre los que se destaca la ciudad de Mar del Plata con una población estable de aproximadamente 560.000 habitantes que suele duplicarse en época estival. Hasta la segunda década del siglo XX, sus playas mostraban un balance natural. El crecimiento de la ciudad y la construcción de diferentes obras costeras trajeron como consecuencia graves problemas de erosión. Actualmente, la erosión costera afecta no solo las playas sino también parte de la ruta interbalsearia. En este caso, el ascenso del nivel del mar posibilita un mayor avance de las olas sobre la playa, favoreciendo la acción erosiva del mar.

En este artículo se presenta la tendencia relativa del nivel medio del mar y su aceleración, para aquellas localidades de la provincia de Buenos Aires de las que se dispone de series de alturas de marea que cubren por lo menos los últimos cincuenta años. Este es el caso del puerto de Buenos Aires y el de Mar del Plata. Merece destacarse que estas dos localidades poseen características geográficas e hidrodinámicas distintas, por lo que resulta de mayor interés comparar los resultados obtenidos.

## Zona de estudio

El Río de la Plata es un estuario muy extenso con orientación general NNO-SSE, formado por la confluencia de los ríos Paraná y Uruguay (figura 1).

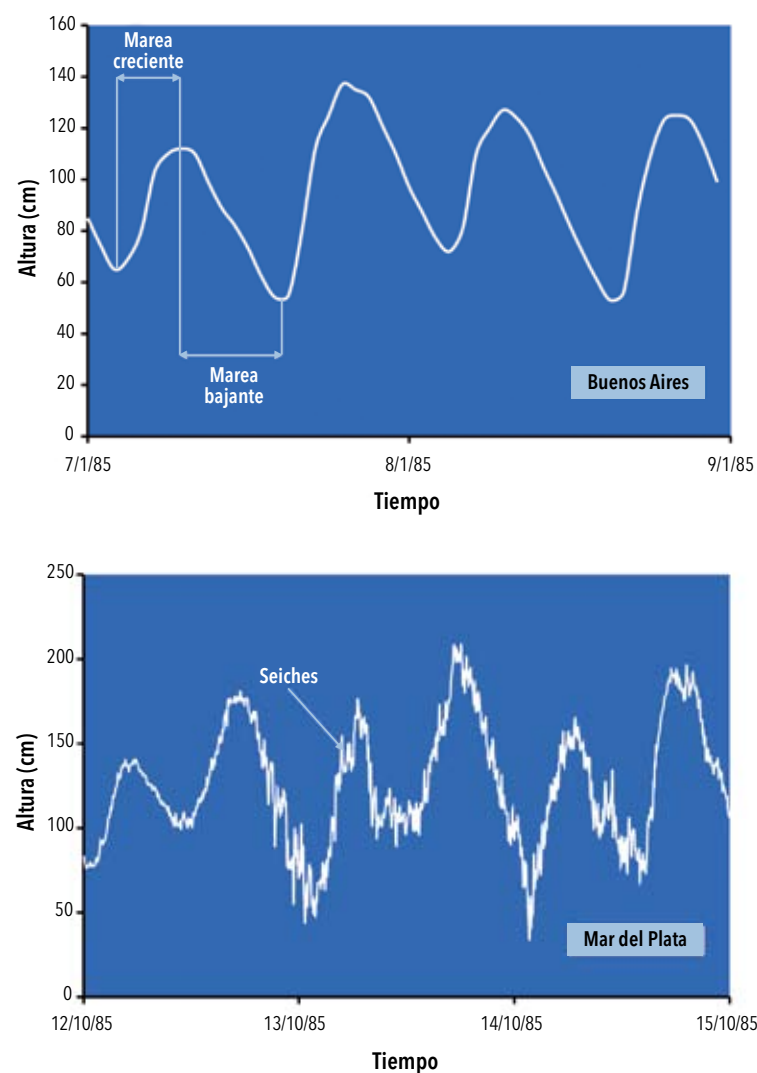
El río Paraná, uno de los más grandes y caudalosos del mundo, forma parte de la hidrovía Paraná-Paraguay que es la arteria hídrica más importante del Mercosur. Desde su nacimiento hasta la desembocadura su curso recorre aproximadamente 2570km con un caudal medio de 16.000m<sup>3</sup>/s en la ciudad de Paraná.

El río Uruguay es el eje de circulación y la frontera natural de la Argentina con Uruguay y Brasil. Es el segundo en importancia dentro del sistema del Plata y su curso recorre 1600km, desde su nacimiento hasta su desembocadura. El caudal medio anual en la ciudad de Salto es de aproximadamente 4600m<sup>3</sup>/s.

El estuario del Río de la Plata tiene una longitud aproximada de 290km y su ancho varía desde 40km en su parte más estrecha hasta 220km en la desembocadura. Sus profundidades, referidas al cero del Riachuelo, varían desde los 5m frente a la ciudad de Buenos Aires hasta los 10 o 20m para la región exterior. Se caracteriza por poseer numerosos bancos de arena que afectan la propagación de la onda de marea. Debido a su forma y poca profundidad, es altamente afectado por los vientos del sudeste. La marea se ve influenciada por la hidrodinámica y geomorfología del río, produciéndose mareas bajantes de mayor duración que las crecientes (figura 2). El régimen de marea es mixto preponderantemente semidiurno: generalmente se observan dos pleamares y dos bajamares diarias con una importante desigualdad diurna (las pleamares consecutivas no alcanzan la misma altura, lo mismo ocurre con las bajamares, figura 2) y excepcionalmente puede encontrarse una sola bajamar y una sola pleamar en el día.

Por su parte, Mar del Plata (figura 1) presenta playas de arena de pendientes suaves de 2° a 3° que se alternan con zonas de acantilados, cuyas alturas pueden alcanzar los 25m. Al igual que las playas arenosas, los acantilados sufren la acción erosiva provocada por las mareas y las olas. En este caso la marea es de naturaleza puramente marítima y se propaga libremente hacia la costa. Sobre esta se observan oscilaciones de alta frecuencia de pe-





**Figura 2** (arriba). Mareograma realizado a partir del procesamiento de registros obtenidos en la estación mareográfica Buenos Aires, perteneciente al SHN, para los días 7, 8 y 9 de enero de 1985. Se indica la diferente duración que tienen la marea creciente y la bajante y la desigualdad diurna. Las alturas están referidas al cero del Riachuelo.

**Figura 3** (abajo). Mareograma realizado a partir del procesamiento de registros obtenidos en la estación mareográfica Mar del Plata Club, perteneciente al SHN, para los días 12, 13, 14 y 15 de octubre de 1985. Se observa una señal de alta frecuencia superpuesta a la onda de marea (seiches). Las alturas están referidas al cero del mareógrafo que pasa a 1,163m por debajo del cero del Instituto Geográfico Militar (IGM).

ríodos comprendidos entre 1 minuto y 2 horas, conocidas como seiches. Estas oscilaciones se deben a la acción de ondas de gravedad, asociadas al pasaje de frentes meteorológicos por la plataforma continental, que fuerzan una oscilación sobre la superficie del agua, que puede sufrir amplificaciones por fenómenos de resonancia al ir acercándose a la costa (figura 3). Su régimen de marea es mixto preponderantemente semidiurno, al igual que en Buenos Aires, con la diferencia de que las desigualdades diurnas son menos pronunciadas y no se encuentran casos de marea de una sola bajar y una sola pleamar diarias.

## Medición de marea y serie de datos

Para el cálculo del nivel medio en el puerto de Buenos Aires se dispone de una serie de alturas horarias correspondientes al período 1905-2006. Desde 1905 a 1959 las mediciones fueron realizadas por el Ministerio de Obras y Servicios Públicos (MOSP), en una estación mareográfica próxima al Antepuerto Sur en Dársena Este. A partir de 1959, las observaciones provienen de una estación perteneciente al Servicio de Hidrografía Naval (SHN) ubicada en el muelle del Club de Pescadores frente al Aeroparque Jorge Newbery de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (figura 4). La distancia entre ambas estaciones es de 9km a lo largo de la cual la topografía y morfología costeras son homogéneas. Como ambas series de mediciones presentan las mismas características mareológicas, pudieron ser unidas y referenciadas a un datum de marea común, que es el cero del Riachuelo, logrando una única serie para el período 1905-2006. Las alturas de marea hasta 1972 fueron obtenidas con mareógrafos analógicos que fueron reemplazados por registradores digitales cuya información es enviada telemáticamente al SHN.

Para el puerto de Mar del Plata se dispone de una serie de alturas horarias correspondientes al período 1956-2006. Desde 1956 hasta 1998 los datos fueron registrados en la estación mareográfica ubicada en el muelle del Club de Pescadores (figura 5). Debido a un embancamiento causado por el relleno de playas realizado por la comuna, la estación debió ser trasladada a las instalaciones de la Base Naval, de donde proviene la última parte del registro (figura 6). Ambas series de mediciones fueron unidas y referenciadas a un datum de marea común.

La estación actualmente en servicio cuenta con un mareógrafo acústico de nueva generación complementado con sensores meteorológicos. Fue instalado en el marco de un convenio entre la Administración Nacional para el Océano y la Atmósfera (NOAA) y el SHN. Esta fue la primera estación de nuestro país en ser seleccionada para incorporarse al proyecto TIGA. Debido a esto la estación cuenta con un registrador continuo GPS de precisión geodésica, cuya antena se observa en la figura 6.

## Método de cálculo

Los niveles medios anuales para los dos puertos mencionados se obtienen calculando la media aritmética de las alturas horarias correspondientes a cada año (figuras 7 y 8).

Para obtener la tendencia del nivel medio, deben atenuarse previamente las contribuciones de la marea astro-

nómica con períodos mayores a un año, debido a que no fueron eliminadas al efectuar el cálculo del nivel medio anual. Para esto, se utiliza un filtro numérico pasabajos, diseñado a partir de la ventana de Kaiser-Bessel. El cálculo de la tendencia se realiza en cada caso ajustando una recta, por el método de cuadrados mínimos, a las series filtradas (figuras 7 y 8).

En ambos casos se obtienen tendencias positivas que indican un ascenso del nivel medio. Para el puerto de Buenos Aires se calculó una tendencia de  $1,67 \pm 0,05\text{mm/año}$  para el período 1905-2006, con un coeficiente de determinación de 0,93. Para Mar del Plata el valor fue  $1,53 \pm 0,11\text{mm/año}$  para el período 1953-2006, con un coeficiente de determinación de 0,84. Néstor Lanfredi y otros encontraron una ten-

dencia de ascenso del nivel medio de  $1,6 \pm 0,1\text{mm/año}$  para el puerto de Buenos Aires durante el período 1905-1992, de  $1,4 \pm 0,5\text{mm/año}$  para Mar del Plata correspondiente al período 1954-1992 y  $1,6 \pm 0,2\text{mm/año}$  para Quequén correspondiente al período 1918-1981.

Como se observa al comparar los resultados, para los puertos de Buenos Aires y Mar del Plata la inclusión de los últimos catorce años de niveles medios no ha modificado significativamente la tendencia en estas dos localidades. Con respecto a Quequén, no se dispuso de suficientes nuevas mediciones como para actualizar el trabajo.

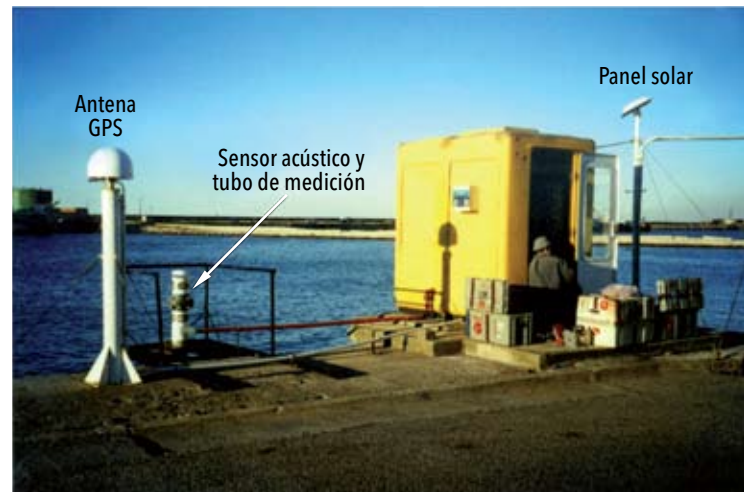
Para obtener mayor información sobre la variación del nivel medio en las estaciones estudiadas, se calcula



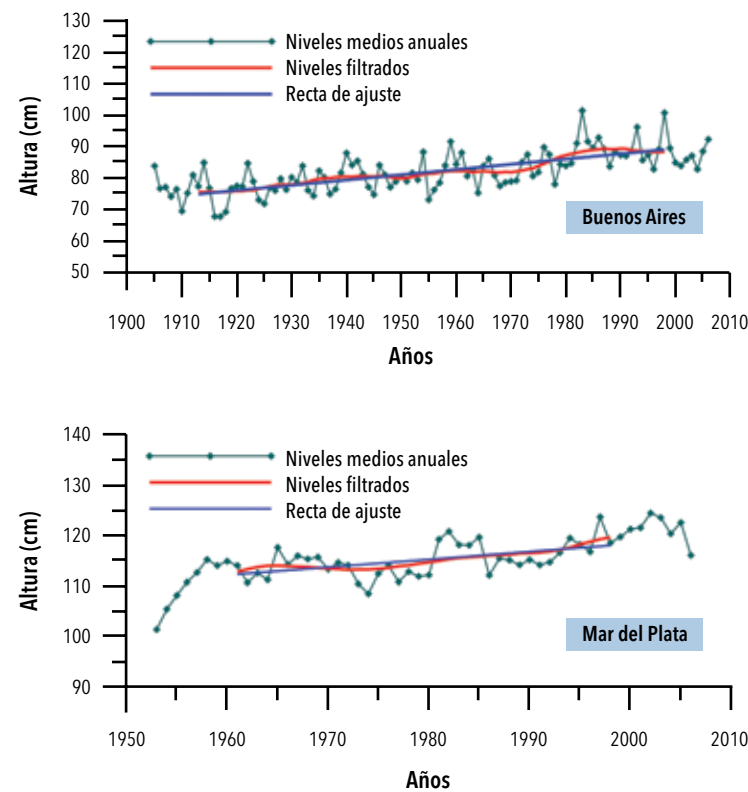
**Figura 4** (izquierda y arriba). Instalaciones del mareógrafo de Buenos Aires, perteneciente al SHN, ubicado en la cabecera del muelle del Club de Pescadores, frente al Aeroparque Jorge Newbery.

**Figura 5** (abajo, ambas). Instalaciones del mareógrafo de Mar del Plata, perteneciente al SHN, ubicado en el muelle del Club de Pescadores.





**Figura 6.** Instalaciones de la primera estación TIGA de la Argentina, ubicada en la Base Naval de Mar del Plata. Se observa en las proximidades del sensor acústico de marea la antena de un receptor GPS que opera en forma continua, monitoreando los movimientos del cero de medición de mareas.



**Figura 7 (arriba).** Se observan los niveles medios anuales obtenidos del procesamiento de registros mareográficos del puerto de Buenos Aires. Estos valores son filtrados para eliminar las posibles contribuciones de la marea astronómica. Los resultados obtenidos se muestran en esta figura juntamente con la recta de ajuste por cuadrados mínimos que permite calcular la tendencia del nivel medio. Los niveles medios están referidos al cero del Riachuelo.

**Figura 8 (abajo).** Se observan los niveles medios anuales obtenidos del procesamiento de registros mareográficos de Mar del Plata. Estos valores son filtrados para eliminar las posibles contribuciones de la marea astronómica. Los resultados obtenidos se muestran en esta figura conjuntamente con la recta de ajuste por cuadrados mínimos que permite calcular la tendencia del nivel medio. Los niveles medios están referidos al cero del mareógrafo que pasa a 1,16m por debajo del cero del IGM.

su aceleración para la totalidad de los períodos. Esta se obtiene ajustando por el método de mínimos cuadrados, una simple parametrización cuadrática sobre los valores filtrados. Las aceleraciones obtenidas para Buenos Aires (1905-2006) y Mar del Plata (1953-2006) son  $0,014 \pm 0,005\text{mm/año}^2$  y  $0,120 \pm 0,006\text{mm/año}^2$  respectivamente. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por otros autores para diferentes lugares de la Tierra.

## Discusión de los resultados y evolución del nivel medio durante esta centuria

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran una tendencia relativa de ascenso del nivel medio del orden de  $1,5\text{mm/año}$ , con aceleraciones inferiores a  $0,15\text{mm/año}^2$ , revelando que en el siglo XX no ha habido una aceleración del ascenso del nivel medio significativa en la costa de la provincia de Buenos Aires.

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en su informe presentado en 2007 estima, a partir de registros mareográficos, un aumento global del orden de  $1,7\text{mm/año}$  y una aceleración de  $0,013\text{mm/año}^2$ . Como se observa, tanto las tendencias como las aceleraciones calculadas para la costa de la provincia de Buenos Aires concuerdan con las estimaciones globales realizadas por el IPCC.

Si bien las características geográficas e hidrodinámicas de ambas localidades son distintas, los resultados obtenidos son similares. Teniendo en cuenta esto, cabe preguntarse qué influencia tiene la descarga de los ríos Paraná y Uruguay en el nivel medio del puerto de Buenos Aires. La respuesta es que el nivel medio no es afectado significativamente por la descarga de estos ríos, excepto en aportes extremos de caudales como los sucedidos en 1983 y 1998 coincidentes con eventos El Niño-Oscilación Sur (ENSO; más información sobre este evento puede encontrarse en <http://www.cdc.noaa.gov/ENSO/>). El caudal medio aportado por los ríos Paraná y Uruguay en conjunto es de aproximadamente  $22.000\text{m}^3/\text{s}$ , mientras que los caudales máximos registrados durante las crecidas de 1983 y 1998 fueron de  $71.290\text{m}^3/\text{s}$  y de  $64.654\text{m}^3/\text{s}$  respectivamente. La razón por la cual el nivel medio no se ve afectado habitualmente por la descarga de estos ríos se debe a que el Río de la Plata va incrementando su ancho a medida que se acerca al océano Atlántico, permitiendo así que el agua proveniente de los ríos Paraná y Uruguay se distribuya sobre una gran superficie sin producir cambios significativos en el nivel medio. Estudios realizados para el puerto de Buenos Aires muestran que para caudales máximos anuales ma-

yores a  $64.000\text{m}^3/\text{s}$  (suma de ambos ríos) y caudales medios anuales mayores a  $41.000\text{m}^3/\text{s}$  (suma de ambos ríos) el nivel medio anual puede tener una variación de hasta 15cm. Desde 1905 hasta el presente esta situación se presentó solamente en las dos inundaciones ya mencionadas.

El IPCC en su informe de 2007 estima en todos los escenarios estudiados (ver CIENCIA HOY, 103: 42-49, 2008) que tanto la temperatura como el nivel del mar continuarán subiendo durante esta centuria. Los valores proyectados para el ascenso del nivel medio del mar estarían en el rango de 18-59cm para los próximos cien años.

Estos resultados fueron obtenidos utilizando modelos climáticos globales, que consisten fundamentalmente en la unión de un modelo atmosférico y uno oceanográfico, a los cuales se les agregan otros, por ejemplo, aquellos que tienen en cuenta el hielo marino o la evapotranspi-

ración del suelo. La alta complejidad de estos modelos dificulta sus calibraciones, por lo que cabe esperar que en la medida en que se sigan efectuando mediciones, estos se vayan optimizando, lo que redundará en ajustes a las predicciones realizadas.

Los resultados aquí presentados aportan información significativa para la elaboración de las normas de manejo en las áreas costeras bonaerenses, sea propiciando la realización de obras de protección o desalentando la ocupación de áreas que puedan ser críticas.

Finalmente, dada la situación planteada y sus proyecciones futuras, es fundamental contar con una amplia red de estaciones mareográficas que posibiliten seguir monitoreando el nivel medio del mar, con la finalidad de mejorar las predicciones referidas a su comportamiento y de establecer políticas que mitiguen los efectos de su ascenso. **CH**

### LECTURAS SUGERIDAS

**BARROS V.**, 2004, *El cambio climático global*, Libros del Zorzal, Buenos Aires.

**BARROS V., MENÉNDEZ A y NAGY G.**, 2005, *El cambio climático en el Río de la Plata*, CIMA, Buenos Aires.

**DOUGLAS BC, KEARNEY M S & LEATHERMAN S P.**, 2001, *Sea Level Rise. History and Consequences*, Academic Press, San Diego-San Francisco-Nueva York-Boston-Londres-Sydney-Tokio, Internacional Geophysics Series, vol. 75.

Informe 2007 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>

**LANFREDI N W, POUSA J L & D'ONOFRIO EE.**, 1998, 'Sea-Level Rise and Related Potential Hazards on the Argentine Coast', *Journal of Coastal Research*, vol. 14, 1, 47-60.

**PUGH D T.**, 2004, *Changing sea level. Effects of Tide, Weather and Climate*, Cambridge University Press.